第36卷 第1期 中国腐蚀与防护学报 Vol.36 No.1
2016年2月 Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection Feb. 2016

金属材料的空化腐蚀行为及影响因素研究进展

林 翠[1,2] 赵晓斌[1] 张翼飞[1]

1. 南昌航空大学材料科学与工程学院 南昌 330063;
2. 南昌航空大学 腐蚀与防护江西省高校重点实验室 南昌 330063

摘要: 综述了金属材料的空化腐蚀行为及影响因素研究现状。介绍了现阶段金属材料空化腐蚀的主要研究方法,以及几种典型金属材料 (Fe、Cu、不锈钢、Ti和形状记忆合金) 的空化腐蚀行为。重点阐述了材料力学性能、材料化学成分和微观组织结构、表面形貌和外界环境等主要因素对金属材料空化腐蚀行为影响的研究情况,并指出了金属材料空化腐蚀进一步研究的方向。

关键词: 空化腐蚀行为 研究方法 金属材料 影响因素

中图分类号: TG172.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537(2016)01-0011-09

Research Progress on Cavitation-corrosion of Metallic Materials

LIN Cui[1,2], ZHAO Xiaobin[1], ZHANG Yifei[1]

1. School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Corrosion and Protection of Jiangxi Province Key Laboratory of College and University, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

Abstract: The current status of study on cavitation corrosion of metal materials was comprehensively reviewed with emphasis on experimental methods and the cavitation corrosion behavior of several typical metals (iron, copper, stainless steel, titanium, shape memory alloy). The effects of mechanical properties, chemical composition, microstructure, and surface morphology of materials as well as the parameters of external environment on the cavitation corrosion behavior of metal materials were introduced. Moreover, the directions for further study on cavitation corrosion of metallic materials are also suggested.

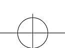
Key words: cavitation corrosion, research method, metallic material, influence factor

1 前言

空化是指液体内部局部压强降低到饱和蒸气压之下时,液体内部或液/固交界面上出现的蒸气或气体空泡形成、发展、坍缩和溃灭的过程[1]。空泡在破灭时产生的高冲击压力对固体材料表面造成破坏,这种现象称为空化腐蚀,即空蚀[2]。空蚀一般发生在流体动力学系统,如涡轮机、泵、阀、变窄部分、水翼和船用螺旋桨等。

国内外研究者做了大量有关金属材料空化腐蚀行为的研究,在不同金属材料、空蚀实验方法、材料的失效机制等方面取得了一定的研究成果。目前,主要利用扫描电子显微镜 (SEM)、原子力显微镜 (AFM)、纳米压痕仪等表面分析和检测方法以及动电位极化曲线和电化学阻抗谱 (EIS) 等电化学测试方法探索金属材料的空化腐蚀机理,研究材料表面的破坏特征。本文总结了近几年来国内外研究者对

定稿日期: 2015-01-21
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51361024) 和江西省研究生创新专项资金项目 (YC2014-S380) 资助
作者简介: 林翠,女,1976年生,博士,教授
通讯作者: 林翠,E-mail: lincwi@126.com,研究方向为材料的腐蚀与防护
DOI: 10.11902/1005.4537.2014.278



金属材料的空化腐蚀行为及影响因素的研究结果。

2 空化腐蚀研究方法

由于空化流的破坏能力很难直接测量，所以大多数以研究材料的空化腐蚀程度为主[3]。为了能够衡量材料经空化腐蚀后的破坏程度，研究人员提出了失重法、体积法、面积法、深度法、蚀坑法、空蚀破坏时间法、放射性同位素法等一系列空蚀程度的表征方法，其中失重法应用较为普遍[2,4]，但失重法并不适用于延展性好的金属材料，蚀坑法在材料表面蚀坑大小不一的情况下不能准确的衡量材料空化腐蚀破坏程度，面积法较繁琐且误差比较大。因此，需要提出一种能准确高效表征材料表面空化腐蚀破坏程度的方法。

目前，主要通过观察和分析金属材料在空化腐蚀发展过程中的表面形貌、化学成分和电化学性质的变化及表面粗糙度、表层力学性质等表面参数来评价空化腐蚀的破坏程度，大致可分为以下3个方面：

(1) 表面形貌和成分的分析技术包括SEM，AFM，X射线衍射仪 (XRD) 和能谱仪 (EDS) 等。有研究者把蚀坑法和面积法相结合，利用SEM空蚀图像和数字图像处理，得到单位面积蚀坑数量、蚀坑面积百分比和蚀坑平均直径3个参数，表征了材料表面空化腐蚀初期的破坏程度[5]；而雍兴跃等[6]在SEM形貌分析的基础上，利用AFM观察奥氏体不锈钢在3.5%NaCl溶液里空化腐蚀过程中的形貌变化，发现腐蚀形貌并不是塑性断口特征，而是晶界优先腐蚀、晶粒凸显且受到明显磨损与腐蚀的形态。

(2) 表面粗糙度和力学性质检测技术包括表面粗糙度轮廓仪、纳米压痕仪、维氏硬度计等。如利用纳米压痕仪测定奥氏体不锈钢在3.5%NaCl溶液中经不同时间空化腐蚀后表层2 μm范围内的纳米硬度和弹性模量，发现材料表层纳米硬度和弹性模量受空化腐蚀时间的影响，从整体变化趋势来看，奥氏体不锈钢表层纳米硬度和弹性模量随着空化腐蚀时间的增加而不断降低[7]；龙霓东等[8]采用电动洛氏硬度仪模拟空蚀过程中的局部载荷作用，发现TiNiNb合金并不是因为相变而提高其抗空化腐蚀能力，而是因为其具有较好的弹性，吸收和释放了大部分空泡溃灭产生的冲击能。

(3) 电化学测试方法主要有动电位极化曲线和EIS等。研究者采用电化学测试技术检测了金属表面因空化作用而产生的电极电位变化，为空化腐蚀过程中的电偶作用的设想提供了直接的实验证据[9,10]；姜胜利等[11]测试了316不锈钢在3%NaCl水溶液中自腐蚀电位下的EIS，阻抗弧随空化腐蚀时间增加而减小 (与钝化膜的减薄有关)，且孕育期后 (3 h) 测得的EIS明显与孕育期内测得的存在明显不同，故EIS技术对材料空化腐蚀孕育期的检查具有一定的可行性。

3 金属材料的空蚀行为研究

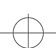
通过研究大量纯金属和合金材料的抗空化腐蚀能力，发现金属材料的抗空化腐蚀性能主要取决于其固体中的结合键、晶体结构及材料的变形和相转变能力[12]。目前国内外对金属材料空化腐蚀行为的研究主要集中在Fe、Cu、不锈钢、Ti和形状记忆合金等金属材料。

3.1 碳钢

在实际工程应用中，对某石油钻井平台上输送污水的弯头联接管 (低碳钢材料) 的失效行为进行分析，发现其表面的腐蚀孔为马蹄形且表面附有腐蚀产物，表面有加工硬化现象，存在变形孪晶和变形流线的变形层，且表面有准解理和解理的断裂特征，进而断定此管的失效由空化腐蚀引起[13]；对40Cr钢和45#钢进行模拟化工泵叶轮流道内工况条件下的空蚀磨损实验，发现两者的平均失重量的变化规律相同，表面形貌磨损形式主要为微切削、犁削和剥落，也许是因为40Cr钢具有较好的韧性、塑性和抗疲劳强度而使其拥有更好的抗空蚀磨损性能[14]。然而，Chen等[15]研究了40Cr钢在水中的空化腐蚀初始阶段，发现材料表面的少量空蚀坑不是由于塑性变形而形成的，空蚀坑内的部分晶粒产生断裂，并可以观察到晶粒断裂的截面。刘厚才等[16]认为45#钢的空化腐蚀失效机制为微射流引起的疲劳裂纹的萌生及扩展，且刘诗汉等[17]发现该材料遭受空化腐蚀后表面的空蚀坑主要发生于铁素体和珠光体的交界或铁素体相区域，也许是铁素体相强度相比珠光体较低和两相交界可能存在缺陷引起的；20SiMn钢在25 ℃的水中空化腐蚀失效机制则主要为沿晶断裂和晶内蚀坑，可能是因为材料内部存在缺陷和不均匀的微观结构[18]。

3.2 Cu

黄铜 ($\alpha+\beta$型) 在25 ℃的蒸馏水中发生空化腐蚀时，由于其表面硬度较低而在极短的时间 (空化腐蚀10 s) 后产生一定的塑性变形，进而表面产生严重的塑性变形，晶界逐渐显现，晶粒间的滑移不断加大，随空化腐蚀时间的增加，加工硬化使塑性变形越来越困难，晶界处裂纹萌生并扩展，晶粒开始脱落，



进入空化腐蚀失重阶段[19]。邓友[20]分别研究了QA19-4铝青铜和锡黄铜HSn70-1在3.5%NaCl溶液中的空化腐蚀行为,发现QA19-4铝青铜空化腐蚀初期的表面基本完整,只是晶界处出现局部变形和裂纹,随着空蚀时间的增加,α相内出现大量滑移带,亚稳态的β相相对于α相优先发生脱铝腐蚀,并在相界处出现细小微孔;而锡黄铜HSn70-1的硬度比QA19-4铝青铜小,孕育期相对比较短,晶界在空化腐蚀初期出现细微裂纹,随着空化腐蚀的进行,裂纹不断向晶粒内部扩展,表面仅发生微弱的脱锌腐蚀。另外,Li等[21]和高丹丹等[22]发现空泡溃灭形成的冲击力导致锡黄铜表面快速发生塑性变形,使得空化腐蚀孕育期不明显,表面的空化腐蚀破坏由纵向裂纹扩展向空蚀坑的横向扩展过渡,最终形成空化腐蚀破坏。

3.3 不锈钢

Niederhofer等[23]在CrMnCN奥氏体不锈钢空化腐蚀的研究过程中发现,表面部分晶粒发生塑性变形,并产生滑移和孪晶,随着塑性变形程度的加剧,在晶界处形成不连续的隆起,晶界处的隆起部分优先发生疲劳破坏;0Cr18Ni9奥氏体不锈钢在蒸馏水中的空化腐蚀初期,表面出现凹坑,继而凹坑扩展使表面局部产生不同程度的塑性变形,部分晶界显现;当空化腐蚀4 h后,材料表面显现明显的滑移带和裂纹,且表面产生严重的塑性变形和脱落,特别是晶体缺陷和夹杂物比较聚集的部分[19]。在空蚀过程中奥氏体相产生由滑移和孪晶引起的塑性变形,消耗了空泡溃灭产生的冲击能,提高了奥氏体不锈钢的抗空化腐蚀能力。正因为奥氏体相具有这一特性,硬度较高的0Cr13Ni5Mo不锈钢在3%NaCl溶液中的抗空化腐蚀性能反而不如硬度较低的1Cr18Mn14N不锈钢,其中0Cr13Ni5Mo不锈钢表面的空蚀坑主要发生在马氏体板条之间,随着空化腐蚀的进行表面形成长条形的破坏区;1Cr18Mn14N不锈钢的铁素体相首先发生空化腐蚀破坏,破坏区域随着空化腐蚀的进行逐渐向奥氏体相扩展[24]。Pohl等[25]研究表明,奥氏体不锈钢和双相不锈钢空化腐蚀孕育期内基本没有质量损失,表面粗糙度值在空化腐蚀孕育期与上升期之间急剧增大,但因为铁素体和奥氏体的形变不一样,致使双相不锈钢表面形貌的幅度分布为负偏态而奥氏体不锈钢表面形貌的幅度分布为正偏态。另外,García-García等[26,27]通过测试在LiBr溶液中静态和动态条件下双相不锈钢的动电位极化曲线发现,空化作用促进了物质传输,从而加速了钝化膜的破坏和局部蚀坑的形成。

3.4 Ti

Ti及钛合金具有良好的抗腐蚀性能是由于其表面极容易自发反应形成钝化膜,但目前有关Ti及钛合金的空化研究比较少[28,29]。纯Ti在蒸馏水中的空化腐蚀初始阶段,表面产生较小的规则的环形凹坑或起伏,当空化腐蚀30 min后,表面发生严重的塑性变形及少量脱落,随空化腐蚀的进行局部区域开始脱落,但纯Ti表面没有产生晶界的滑移和裂纹[19]。然而,纯Ti在3.5%NaCl溶液中空化腐蚀孕育期,材料表面发生塑性变形且局部出现少量的空蚀坑和裂纹,表面空蚀坑和裂纹随空化腐蚀的进行而不断扩展,材料表面产生大量脱落[30,31];Ti-6Al-4V合金在3.5%NaCl溶液中空化腐蚀孕育期阶段,材料表面产生不太明显的塑性变形,在局部形成疲劳微裂纹,当空化腐蚀进行到一定程度时,裂纹沿晶界和夹杂物扩展使表面形成较大空蚀坑和裂纹,致使晶粒剥落,进入Ti-6Al-4V合金空化腐蚀上升期[30-32]。相对钛合金而言,塑性较好、弹性模量值较小的纯Ti的空化腐蚀初期主要以塑性变形为主,对应变比较敏感的密排六方结构、含有较多的包含物和晶粒粗大也许是纯Ti的抗空化腐蚀性能不如钛合金的原因。

钛合金表面的钝化膜会对材料的空化腐蚀产生一定程度的影响,Neville等[33]研究纯Ti和3种钛合金(Ti-6Al-4V ELI,Ti-6Al-4V ELI/Ru和Ti 5111)在18 ℃的3.5%NaCl溶液的磨损-腐蚀环境中空蚀过程中腐蚀的作用时发现,在空化条件下只有纯Ti在钝化膜破坏后的活性区域发生了腐蚀。

3.5 形状记忆合金

形状记忆合金具有良好的抗疲劳和耐腐蚀及优良的形状记忆效果和伪弹性等性能,而被广泛应用于航空航天、机械工程、能源建筑和生物医学等领域[34,35]。柳伟等[36]和龙霓东等[37]认为形状记忆合金在空化腐蚀过程中对空泡溃灭产生的冲击能的相变吸收和弹性缓冲耗散,使其具有优良的抗空化腐蚀性能。TiNi形状记忆合金在25 ℃的NaCl溶液中空化腐蚀初期,表面产生加工硬化,空化腐蚀180 min后材料表面硬度保持恒定,且表面只发生轻微的损伤;空化腐蚀300 min后试样质量和表面粗糙度都没有出现明显的变化,可观察到表面仍有未被破坏的区域[38]。王再友等[39]通过对Fe-25Mn-6Si-7Cr形状记忆合金在水中进行空化腐蚀实验发现,其空蚀破坏机制为沿晶断裂和晶内空蚀坑,空蚀48 h后

的失重量明显小于0Cr13Ni5Mo不锈钢的失重量，伪弹性是Fe-25Mn-6Si-7Cr形状记忆合金的抗空化腐蚀性能的主要原因。

4 空蚀影响因素研究

4.1 材料力学性能的影响

一般而言，具有较高的初始硬度和淬透性的钢，其耐空化腐蚀能力也比较高[40]。对纯Ti及Ti-6Al-4V合金在3.5%NaCl溶液中进行空化腐蚀实验，可知硬度较高的Ti-6Al-4V合金比纯Ti具有更好的耐空化腐蚀性能[32,41]；对Cr-Ni-Mo合金和Cr-Ni-Co合金在人工海水中进行空化腐蚀实验，发现硬度和加工硬化性能都较高的Cr-Ni-Co合金的抗空化腐蚀性能也比较好[42]。但并不是硬度高的金属材料抗空化腐蚀性能就好，硬度较低的金属材料呈现良好抗空化腐蚀性能的重要原因可能是因为其具有良好的加工硬化性能，如低硬度的Cr-Mn-N不锈钢在蒸馏水中的抗空化腐蚀性能高于高硬度的0Cr13Ni5Mo不锈钢[43]，低硬度的HSn70-1锡黄铜在3.5%NaCl溶液中的抗空化腐蚀性能明显优于高硬度的QA19-4铝青铜[20]，低硬度的奥氏体单相和奥氏体-铁素体双相Cr-Mn-N钢在蒸馏水里比高硬度的0Cr13Ni5Mo不锈钢更耐空化腐蚀[24,44]。因此，硬度也许并不是影响金属材料抗空化腐蚀性能的主要因素，金属材料的加工硬化性也对其抗空化腐蚀性能有重要影响。

金属材料的抗空化腐蚀性能与材料的屈服强度和抗拉强度有关，屈服强度和抗拉强度数值较低时，金属材料空化腐蚀的累积失重量较大，反之亦然；且金属材料具有较高的冲击功、延伸率和弹性有利于提高其耐空化腐蚀能力，如00Cr13Ni5Mo马氏体不锈钢[45]、铸造钛合金[46]和TiNiNb合金[8]。但是金属材料的硬度、屈服强度、抗拉强度、冲击功、延伸率和弹性等力学性能与其空化腐蚀的累积失重量之间并不存在完全对应的关系。另外，Jiang等[47]认为有较高冲击韧度值的贝氏体具有更好的抗空蚀性，且增加下贝氏体的相对含量能够提高抗空蚀性，并利用光学显微镜和SEM探索了空化机理，由于钢中下贝氏体相拥有较高的韧性和有效的耐冲击性阻止了蚀坑与裂纹的扩展和延伸。同时，Będkowski等[48]对3种不锈钢 (10HNAP，18G2A和15G2ANb) 进行单轴随机载荷作用的疲劳实验，其结果分别与3种材料表面因空化腐蚀引起的疲劳破坏拥有相类似的数学模型。研究者还发现，与传统的304等奥氏体不锈钢相比，新型Cr-Co-Ni-Mn奥氏体不锈钢的高屈服强度和抗拉强度、低塑性，使其具有更长的孕育期和更好的抗空化腐蚀性能[49]。

4.2 材料化学成分和微观组织结构的影响

金属材料的化学组成成分和微观结构通常对材料的耐空化腐蚀性能起到重要作用。向Fe-12Cr-0.4C合金中分别加入5%，7%和10% (质量分数) 的Ni和Mn，发现添加Ni的合金抗空化腐蚀性能随Ni含量增加而降低，而添加Mn的合金抗空化腐蚀性能随Mn含量增加而升高，而且添加了Mn的合金比添加了Ni的合金更耐空化腐蚀[50]。奥氏体不锈钢因含有较高的Co和Cr等元素，使其具有较低的层错能，同时空化腐蚀过程中产生的应变诱发奥氏体向马氏体转变吸收了空泡溃灭时生成的冲击能，延长了孕育期时间，所以Cr-Co-Ni-Mn奥氏体不锈钢[51]和Fe-Cr-Ni-C合金[52]具有较高的耐空化腐蚀能力。

由奥氏体和铁素体组成的1Cr18Mn14N不锈钢，在空蚀过程中因奥氏体相发生滑移和孪生引起的塑性变形消耗了空泡溃灭产生的冲击能量，从而提高了1Cr18Mn14N不锈钢的抗空化腐蚀性能[24]。当马氏体转变达到合金的饱和点后，继续对材料进行空化腐蚀，表面层的转变马氏体被剥离，材料的质量损失率开始增大；同时，表面暴露出来的奥氏体基底层，继续吸收空泡溃灭时生成的冲击能形成新的转变马氏体。因此，奥氏体的相变不仅延长了孕育期，还提高了耐空化腐蚀能力[51−53]。另外，Wang等[54]认为相的转化特性极大地影响了相变对被测试材料耐空化腐蚀能力的效果，如应变诱导的密排六方马氏体的Fe-Mn-Si-Cr形状记忆合金抗空化腐蚀能力远大于应变诱导的bcc马氏体的Cr-Ni-Mn不锈钢。

当组织不均匀的金属材料发生空化腐蚀时，较弱组织先被破坏，而组织均匀和提高材料的纯度对其抗空化腐蚀性能有利[55]；晶粒越细小，晶界的表面密度增大，材料的硬度、屈服强度、抗拉强度和疲劳强度等力学性能得到了改善，金属材料的耐空化腐蚀能力相对越好[30,56]。Zhang等[57]认为α相铝青铜的空化腐蚀行为是一个形变控制过程，堆垛层错能越大，其抗空化腐蚀能力越差；Fe-Cr-Ni-C铸态合金的抗空化腐蚀性能主要受其所含碳化物形貌的影响，碳化物形貌影响了应力在基体和碳化物上的分布，导致空蚀对碳化物呈粗糙形貌 (M_7C_3) 的合金的破坏发生在碳化物相，而对碳化物呈细粒形貌 ($M_{23}C_6$) 的合金的破坏发生在碳化物与基体的界面[58]。此外，刘诗汉等[59]发现，双相材料的空化腐蚀破坏主要由低强度相决定，当材料的组织成分主要为低强度相时，其表面产生蚀坑、大面积的塑性变形和晶界及

相界处形成裂纹；而材料的低强度相含量少时，它会吸收空化冲击能，减轻高强度相的空化腐蚀破坏程度，低强度相从表面凸起、两相在相界逐渐分离、裂纹在相界处形成并向高强度相扩展。空泡溃灭对材料表面产生的应力会使邻近晶体发生变化而形成电位差，促进空化腐蚀，对金属材料的晶体结构和由应力引起的电化学反应的关联性需要进一步研究。

4.3 材料表面形貌的影响

对于研究金属材料表面的空化腐蚀行为来讲，金属材料的表面状态就显得尤为重要，因为表面状态不仅会影响空化程度，而且还会影响空化腐蚀破坏过程。

一般认为粗糙表面会促进空化腐蚀的发生，因为粗糙表面含有凹槽、凸沿和坡底等微小结构，含有的空化气核较多，致使空化程度增大[17]。为了研究金属材料表面粗糙度对其空化腐蚀程度的影响，许多研究者采取刨削、铣削和磨削等加工方法实现表面形貌构型，使得定性甚至定量研究表面形貌在空化腐蚀发生过程中的作用机理成为可能[17,60]。金属材料的空化腐蚀程度与其表面粗糙度之间并不成线性关系。李永健[60]分别对45#钢试样表面经3种(磨削、铣削和刨削) 不同方法加工后在水中空化腐蚀1 h，发现粗糙度值较大的铣削形貌表面的蚀坑数最少，粗糙度值最大的刨削形貌表面的蚀坑数最多。对两种表面粗糙度不同的45#钢进行空化腐蚀实验，由于粗糙表面的大量裂隙和缺陷增加了空化腐蚀破坏的几率，冲击中心区的高压的卸载时间延长，导致空蚀坑加深，同时表面凸沿受到侧流的强烈冲击发生破断和表面撕裂，最终致使粗糙表面的空化腐蚀程度比光滑表面的严重[17]。

然而，一定程度的规则的表面起伏能较好的减缓空化微射流对材料的作用，使其具有较好的耐空化腐蚀能力[19]。如材料表面形貌构型的大小、形状和分布都对材料的空化腐蚀程度有影响，展向沟槽对空化腐蚀程度的影响大于流向沟槽[60]；粗糙度参数 R_{sm} (轮廓的平均间距) 与 R_q (轮廓均方根偏差) 之比值越大，CA6NM马氏体不锈钢的空化腐蚀孕育期越长，抗空化腐蚀性能越好[61]。实际应用中的机械部件表面形貌各不相同，仍需系统性的探索材料表面形貌对空化腐蚀的影响。

4.4 外界环境因素的影响

对于纯Ti和Ti-6Al-4V合金来说，在相对温度范围为16~43 ℃的海水中，其空化腐蚀的体积损失率随温度升高而增大[62]。通过研究温度对超级双相不锈钢 (UNS S32760) 在3.5%NaCl溶液中的空化腐蚀行为的影响，发现材料的平均深度渗透率随温度升高而增大，当平均深度渗透率达到最大值 (溶液温度为50 ℃) 后便随温度升高而减小；同时，在23 ℃的3.5%NaCl溶液中，材料的平均深度渗透率随pH值增大而减小，当平均深度渗透率达到最大值 (pH=9时) 后便随pH值增大而增大[63]。其中，当温度升高到一定程度后空化腐蚀破坏程度减弱的原因不仅是空泡内迅速加大的蒸汽量对空泡溃灭起缓冲作用，还包括：固壁附近的空化泡与周围空气泡相互作用的增强和含气型空化比例的增加，改变微射流的方向，降低微射流的速度，增加空泡溃灭的时间，消减传递到固壁的高强冲击荷载而减免空蚀[64]。另外，材料所服役环境中液体介质的性质会影响材料的空化腐蚀行为，如液体流速越大，材料空化腐蚀孕育期里的点蚀率越大[65,66]；液体的粘度和表面张力降低，空化腐蚀程度会增大[67]；液体中含有固体颗粒会加剧材料表面的空化腐蚀破坏程度，但固体颗粒大小或含量与空化腐蚀程度不呈单调的增减关系[14,60,67]。

在实际工程应用中，像舰船、化工类机械设备等服役的环境具有较强的腐蚀性，因此在研究过流部件的空化腐蚀问题时有必要考虑环境因素的影响。研究[24]表明，1Cr18Mn14N双相不锈钢在3%NaCl溶液中的抗空化腐蚀性能比0Cr13Ni5Mo不锈钢好；而在具有强腐蚀性的0.5 mol/L HCl溶液中，由于阳极溶解和H的共同作用，导致不锈钢表面的裂纹扩展，使1Cr18Mn14N双相不锈钢的抗空化腐蚀性能反而不如0Cr13Ni5Mo不锈钢。环境因素一般都会促进金属材料的空化腐蚀，如20SiMn低合金钢在3%NaCl溶液中空蚀2.5 h后的失重量约为其在蒸馏水中的空蚀失重量的两倍[68]；纯Ti和TC4合金分别在3.5%NaCl溶液中空蚀8 h后的失重量约为其在去离子水中的一倍[32]。但环境因素对金属材料在液/固双相流中的空蚀失重量的促进作用反而小于其在单相流所起的促进作用[68]。此外，研究者还发现空化强度较低时，材料的质量损失量较小且表面损伤不太明显，即空化腐蚀速率和平均穿透深度与空化强度有关[69]。因此，材料所服役的环境复杂，且影响因素比较多，需对材料发生空化腐蚀的环境进行分类，从而系统性的探索外界环境因素对空化腐蚀的影响规律。

由于金属材料本身的成分和组织结构不同，且应用的环境也相差很大，致使金属材料的空化腐蚀行为的影响因素没有一致的明确规律，金属材料空化腐蚀的主要影响因素及其作用效应如表1。

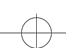
表1 金属材料空化腐蚀的主要影响因素

Table 1 Major factors affecting cavitation corrosion of metallic materials

Factor	Indicator	Principal effect
Mechanical properties of materials	Microhardness	Generally, the higher the microhardness of material is, the more resistant to cavitation corrosion is. But the relationship between them is not monotone increase or decrease.
	Work-hardening property	Higher work-hardening property, more resistant to cavitation corrosion.
	Yield strength	Higher yield strength, more resistant to cavitation corrosion.
	Tensile strength	Higher tensile strength, more resistant to cavitation corrosion.
	Toughness	Higher toughness, more resistant to cavitation corrosion.
Chemical composition and microstructure of materials	Chemical composition	Higher mass fraction of elements such as Mn, Co and Cr and lower mass fraction of Ni increase the resistance of cavitation corrosion.
	Crystal structure	The material with austenitic phase is more resistant to cavitation corrosion, resulting from phase transition or plastic deformation caused by its absorption of the impact energy. The resistance of cavitation corrosion of material is mainly determined by the lower intensity phase.
	Crystal size	The material with fine grains has good mechanical properties, which is beneficial for the resistance of cavitation corrosion.
	Stacking fault	Lower stacking fault energy of materials, more resistant to cavitation corrosion.
Surface topography	Surface roughness	Normally, the material with the rough surface is more prone to cavitation corrosion. But the relationship between them is not monotone increase or decrease.
	Surface geometry	Undulating surface can prolong incubation period, improving the resistance of cavitation corrosion.
External environment	Medium flow rate	Larger flow rate of medium will promote cavitation corrosion of materials.
	Temperature of medium	Higher temperature in medium will promote cavitation corrosion of material. But the relationship between them is not monotone increase or decrease.
	Corrosive medium	Corrosive medium will promote cavitation corrosion of material, and the value of pH and concentration of medium also significantly affect the degree of cavitation corrosion.
	Solid particles	Solid particles will accelerate cavitation corrosion of material. But the relationship between the size and content of solid particles and the degree of cavitation corrosion is not monotone increase or decrease.

5 结语

(1) 目前主要利用SEM，AFM，XRD，EDS和纳米压痕仪等表面分析方法及动电位极化曲线、EIS等电化学测试方法与失重法、体积法、面积法和蚀坑法等相结合，研究金属材料空化腐蚀的破坏程度和空化腐蚀行为。金属材料服役于腐蚀性环境中大多



数都会涉及到一个电化学过程，应深入研究材料表面在空化腐蚀过程中的电化学行为，从而进一步深入了解和阐明金属材料的空化腐蚀机理。

(2) 尽管材料的化学成分和表面形貌及一些外界环境条件等对金属材料空化腐蚀行为的影响没有统一规律，但有许多共同点：塑性、韧性较好的材料更耐空化腐蚀；一定程度的规则表面起伏，能够延长孕育期时间；腐蚀性介质、固体颗粒等会促进材料的空化腐蚀破坏程度。材料的组织结构和性能决定了其抗空化腐蚀能力，还需系统性的探索材料表面形貌和外界环境因素对不同组织结构类型材料的影响规律。

(3) 金属材料 (如钛合金、不锈钢等) 表面的钝化膜能够阻止其在腐蚀性环境中进一步腐蚀，空泡溃灭产生的冲击力可能会破坏表面的钝化膜及附着的腐蚀产物，而目前很少有文献与此有关，有必要研究金属材料表面的钝化膜在空化腐蚀过程中的影响作用。当表面钝化膜局部破坏后会形成蚀坑，加速材料的破坏，进一步研究力学因素与腐蚀环境因素的交互作用是一个重点方向。

参考文献

[1] Chen D L. Cavitation and cavitation erosion [J]. China Basic Sci., 2010, (6): 3
(陈大融. 空化与空蚀研究 [J]. 中国基础科学, 2010, (6): 3)

[2] Huang J T. Principle and Application of Cavitation and Cavitation Erosion [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991
(黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991)

[3] Jin T L. The research status and trends of cavitation and cavitation erosion [J]. Water Power, 1982, (1): 38
(金泰来. 空化与空蚀研究的现状和动向 [J]. 水力发电, 1982, (1): 38)

[4] Li G S, Shen X H, Shi L D, et al. Review of studies on cavitation and cavitation erosion [J]. J. Univ. Petro., 1997, 21(1): 97
(李根生, 沈晓明, 施立德等. 空化与空蚀机理及影响因素 [J]. 石油大学学报, 1997, 21(1): 97)

[5] Du C, Xu W L, Wang J D, et al. A characterization method of cavitation erosion incubation period [J]. Lubric. Eng., 2011, 36(3): 16
(杜川, 徐万里, 汪家道等. 空蚀初生期破坏程度的表征方法 [J]. 润滑与密封, 2011, 36(3): 16)

[6] Yong X Y, Ji J, Zhang Y Q, et al. AFM morphology and cavitation corrosion process of austenitic stainless steel by cavitation [J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2011, 23(2): 116
(雍兴跃, 吉静, 张雅琴等. 空化作用下奥氏体不锈钢空泡腐蚀的过程与AFM形貌 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(2): 116)

[7] Li D L. Relationship between the surface layer mechanical properties of austenitic stainless steel with corrosion failure [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012
(李栋梁. 奥氏体不锈钢表层力学性质变化与腐蚀失效间的关系 [D]. 北京: 北京化工大学, 2012)

[8] Long N D, Zhu J H. Cavitation erosion of TiNiNb alloy [J]. Rare Met. Mater. Eng., 2003, 32(9): 740
(龙霓东, 朱金华. TiNiNb 合金的空蚀 [J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(9): 740)

[9] Zhang X L, Sun D B, Yu H Y, et al. Research on electrochemical test apparatus of cavitation corrosion [A]. The 20th Anniversary of the Funding of Chinese Society for Corrosion and Protection [C]. Beijing, 1999: 559
(张秀丽, 孙冬柏, 俞宏英等. 空泡腐蚀电化学试验装置研究 [A]. 中国腐蚀与防护学会成立20周年论文集 [C]. 北京, 1999: 559)

[10] Fernández-Domene R M, Blasco-Tamarit E, García-García D M, et al. Cavitation corrosion and repassivation kinetics of titanium in a heavy brine LiBr solution evaluated by using electrochemical techniques and confocal laser scanning microscopy [J]. Electrochim. Acta, 2011, 58: 264

[11] Jiang S L, Zheng Y G, Luo S Z, et al. Corrosion behavior of type 316L stainless steel before and after incubation period of cavitation erosion [J]. Corros. Prot., 2004, 25(4): 139
(姜胜利, 郑玉贵, 骆素珍等. 空蚀孕育期前后316L不锈钢的腐蚀行为 [J]. 腐蚀与防护, 2004, 25(4): 139)

[12] Brunattoa S F, Allenstein A N, Allenstein C L M, et al. Cavitation erosion behaviour of niobium [J]. Wear, 2012, 274/275: 220

[13] Wu Z W, Chen L, Liang S Z, et al. Cavitation corrosion characteristics of low-carbon steel [J]. Mater. Mech. Eng., 2008, 32(6): 82
(吴志伟, 陈灵, 梁思祖等. 低碳钢的空泡腐蚀特征 [J]. 机械工程材料, 2008, 32(6): 82)

[14] Pang Y X, Liu H C, Zhu Z M, et al. Experimental study of interactive erosion and cavitation wears of 40Cr [J]. Lubric. Eng., 2011, 36(8): 20
(庞佑霞, 刘厚才, 朱宗铭等. 40Cr冲蚀与空蚀交互磨损试验研究 [J]. 润滑与密封, 2011, 36(8): 20)

[15] Chen H H, Li J, Chen D R, et al. Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in water [J]. Wear, 2008, 265: 692

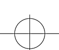
[16] Liu H C, Chu A M. Cavitation erosion of 1Cr13 [J]. Coal Mine Mach., 2008, 29(10): 33
(刘厚才, 褚爱民. 1Cr13的空蚀磨损性能 [J]. 煤矿机械, 2008, 29(10): 33)

[17] Liu S H, Chen D R. On mechanism of cavitation erosion of rough surface [J]. Lubric. Eng., 2009, 34(3): 6
(刘诗汉, 陈大融. 粗糙表面的空蚀机制研究 [J]. 润滑与密封, 2009, 34(3): 6)

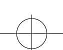
[18] Wang Z Y, Chen H P, Xu Y G, et al. Failure behavior of 20SiMn steel in erosion and cavitation erosion processes [J]. J. Xi'an Jiaotong Univ., 2002, 36(7): 744
(王再友, 陈黄浦, 徐英鸽等. 20SiMn钢冲蚀和空蚀的失效行为研究 [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(7): 744)

[19] Zhang N W. Investigation of cavitation erosion mechanism on several typical materials [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008
(张念武. 几种典型材料的空蚀磨损机理研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2008)

[20] Deng Y. Cavitation erosion behavior of two typical copper based



alloys [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007
(邓友. 两种典型铜合金的空蚀行为研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007)
[21] Li X Y, Yan Y G, Ma L, et al. Cavitation erosion and corrosion behavior of copper-manganese-aluminum alloy weldment [J]. Mater. Sci. Eng., 2004, A382: 82
[22] Gao D D, Zhang X B, Liao Z K, et al. Failure behavior of tin brass caused by cavitation [J]. J. Chongqing Univ. Technol., 2014, 28 (4): 42
(高丹丹, 张小彬, 廖志康等.锡黄铜空蚀破坏的失效行为研究 [J]. 重庆理工大学学报, 2014, 28(4): 42)
[23] Niederhofer P, Huth S. Cavitation erosion resistance of high interstitial CrMnCN austenitic stainless steels [J]. Wear, 2013, 301: 457
[24] Luo S Z, Zheng Y G, Jiang S L, et al. Cavitation corrosion resistance of 1Crl8Mnl4N duplex stainless steel in corrosive media [J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2004, 16(6): 352
(骆素珍, 郑玉贵, 姜胜利等. 1Crl8Mnl4N双相不锈钢在腐蚀介质中的抗空蚀性能 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(6): 352)
[25] Pohl M, Stella J. Quantitative CLSM roughness study on early cavitation-erosion damage [J]. Wear, 2002, 252: 501
[26] García-García D M, García-Antón J, Igual-Muñoz A, et al. Effect of cavitation on the corrosion behavior of welded and non-welded duplex stainless steel in aqueous LiBr solutions [J]. Corros. Sci., 2006, 48(9): 2380
[27] García-García D M, García-Antón J, Igual-Muñoz A. Influence of cavitation on the passive behaviour of duplex stainless steels in aqueous LiBr solutions [J]. Corros. Sci., 2008, 50(9): 2560
[28] Zhang Y F, Lin C, Du N, et al. Cavitation corrosion behavior of TC4 titanium alloy in lithium bromide solution [J]. Corros. Prot., 2015, 36(6): 522
(张翼飞, 林翠, 杜楠等. TC4钛合金在溴化锂水溶液中的空蚀行为 [J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(6): 522)
[29] Pawel S J, Mansur L K. Preliminary evaluation of cavitation-erosion resistance of Ti-alloys in mercury for the spallation neutron source [J]. J. Nucl. Mater., 2010, 398(1-3): 180
[30] Shi Y T. The research on the resistance of the cavitation performance of pure titanium and TC4 titanium alloy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012
(史烨婷. 纯钛及TC4钛合金抗空蚀性能的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012)
[31] Man H C, Cui Z D, Yue T M, et al. Cavitation erosion behavior of laser gas nitride Ti and Ti-6Al-4V [J]. Mater. Sci. Eng., 2003, A355(1/2): 167
[32] Guan X. Cavitation erosion behavior of titanium and Ti-6Al-4V alloy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010
(关昕. 钛及Ti-6Al-4V合金的空蚀行为研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010)
[33] Neville A, McDougall B A B. Erosion-and cavitation-corrosion of titanium and its alloys [J]. Wear, 2001, 250(1-12): 726
[34] Cai W, Meng X L, Zhao L C. Recent development of TiNi-based shape memory alloys [J]. Curr. Opin. Solid State Mater. Sci., 2005, 9(6): 296
[35] Wang Y S, He Z L, Wang Q, et al. Research progress on properties and application of Ti-Ni shape memory alloys [J]. Mater. Heat Treat., 2009, 38(20): 18
(王永善, 贺志荣, 王启等. Ti-Ni形状记忆合金性能及应用研究进展 [J]. 材料热处理技术, 2009, 38(20): 18)
[36] Liu W, Zheng Y G, Rao G B, et al. Effect of phase transformation pseudo-lasticity on resistance of NiTi alloy to cavitation-abrasion in multiphase flow [J]. Acta Metall. Sin., 2002, 38(2): 185
(柳伟, 郑玉贵, 饶光斌等. 相变伪弹性对NiTi合金多相流损伤的影响 [J]. 金属学报, 2002, 38(2): 185)
[37] Long N D, Zhu J H. A comparison of the cavitation erosion resistance of two Fe-based shape memory alloys [J]. Rare Met. Mater. Eng., 2004, 33(8): 852
(龙霓东, 朱金华. 两种铁基形状记忆合金抗空蚀性能比较 [J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(8): 852)
[38] Wu S K, Lin H C, Yeh C H. A comparison of the cavitation erosion resistance of TiNi alloys, SUS304 stainless steel and Ni-based self-fluxing alloy [J]. Wear, 2000, 244: 85
[39] Wang Z Y, Zhu J H. Cavitation erosion of a Fe-25Mn-6Si-7Cr shape memory alloy [J]. Chin. J. Mater. Res., 2003, 17(1): 39
(王再友, 朱金华. Fe-25Mn-6Si-7Cr形状记忆合金空蚀研究 [J]. 材料研究学报, 2003, 17(1): 39)
[40] Rudakov A A. Relation between parameters of cavitation resistance and structure of steels [J]. Met. Sci. Heat Treat., 2005, 47(1/2): 12
[41] Mochizuki H, Yokota M, Hattori S. Effects of materials and solution temperatures on cavitation erosion of pure titanium and titanium alloy in seawater [J]. Wear, 2007, 262(5/6): 522
[42] Xu G F, Qin M M, Lei Y C, et al. Cavitation erosion resistance of Cr-Ni-Mo and Cr-Ni-Co overlaying alloys [J]. Rare Met. Mater. Eng., 2012, 41(9): 1555
(徐桂芳, 秦敏明, 雷玉成等. 新型Cr-Ni-Mo和Cr-Ni-Co堆焊合金空蚀性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(9): 1555)
[43] Liu W, Zheng Y G, Liu C S, et al. Cavitation erosion behavior of Cr-Mn-N austenite-ferrite stainless steel [J]. Acta Metall. Sin., 2003, 39(1): 85
(柳伟, 郑玉贵, 刘常升等. Cr-Mn-N奥氏体不锈钢的空蚀行为 [J]. 金属学报, 2003, 39(1): 85)
[44] Liu W, Zheng Y G, Liu C S, et al. Cavitation erosion behavior of Cr-Mn-N stainless steels in comparison with 0Cr13Ni5Mo stainless steel [J]. Wear, 2003, 254: 713
[45] Qin B, Qin C P, Zheng Y G. Effect of mechanical properties on cavitation erosion resistance of 00Crl3Ni5Mo martensitic stainless steel [J]. Large Electr. Mach. Hydraul. Turb., 2013, (4):45
(秦斌, 秦承鹏, 郑玉贵. 力学性能对低碳马氏体不锈钢00Crl3Ni5Mo抗空蚀性能的影响 [J]. 大电机技术, 2013, (4): 45)
[46] Liu J. Cavitation corrosion resistance of cast high strength titanium alloy [J]. Develop. Appl. Mater., 1996, 11(1): 13
(刘激. 高强度铸造钛合金的耐空蚀性能 [J]. 材料开发与应用, 1996, 11(1): 13)
[47] Jiang G B, Zheng Y K, Yang Y Y, et al. Cavitation erosion of bainitic steel [J]. Wear, 1998, 215: 46
[48] Będkowski W, Gasiak G, Lachowicz C, et al. Relations between cavitation erosion resistance of materials and their fatigue strength under random loading [J]. Wear, 1999, 230: 201
[49] Liu Q, Li B, Chen X Z, et al. Study on an Cr-Co-Ni-Mn austenitic



stainless steel for cavitation erosion [J]. J. Funct. Mater., 2012, 43 (5): 673
(刘强, 李波, 陈希章等. 新型耐空蚀Cr-Co-Ni-Mn奥氏体不锈钢研究 [J]. 功能材料, 2012, 43(5): 673)

[50] Park M C, Kim K N, Shin G S, et al. Effects of Ni and Mn on the cavitation erosion resistance of Fe-Cr-C-Ni/Mn austenitic alloys [J]. Tribol. Lett., 2013, 52(3): 477

[51] Liu Q, Li B, Chen X Z, et al. Cavitation erosion behavior of a Cr-Co-Ni-Mn austenitic steel [J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2012, 24 (5): 381
(刘强, 李波, 陈希章等. Cr-Co-Ni-Mn奥氏体钢的空泡腐蚀研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(5): 381)

[52] Park M C, Kim K N, Shin G S, et al. Effects of strain induced martensitic transformation on the cavitation erosion resistance and incubation time of Fe-Cr-Ni-C alloys [J]. Wear, 2012, 274/275: 28

[53] Xiaojun Z, Procopiak L A J, Souza N C, et al. Phase transformation during cavitation erosion of a Co stainless steel [J]. Mater. Sci. Eng., 2003, A358: 199

[54] Wang Z Y, Zhu J H. Effect of phase transformation on cavitation erosion resistance of some ferrous alloys [J]. Mater. Sci. Eng., 2003, A358: 273

[55] Chen Y. Comparison of cavitation erosion resistance between irons and steels [J]. Hot Work. Technol., 2000, (3): 25
(陈岩. 不同材料抗气蚀性能的比较 [J]. 热加工工艺, 2000, (3): 25)

[56] Bregliozzi G, Schino A D, Ahmed S I -U, et al. Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain sizes [J]. Wear, 2005, 258: 503

[57] Zhang X F, Fang L. The effect of stacking fault energy on the cavitation erosion resistance of α-phase aluminum bronzes [J]. Wear, 2002, 253: 1105

[58] Cuppari M G D V, Souza R M, Sinatora A. Effect of hard second phase on cavitation erosion of Fe-Cr-Ni-C alloys [J]. Wear, 2005, 258: 596

[59] Liu S H, Chen D R. Mechanics mechanism of duplex steel cavitation damage [J]. Acta Metall. Sin., 2009, 45(5): 519
(刘诗汉, 陈大融. 双相钢空蚀破坏的力学机制 [J]. 金属学报, 2009, 45(5): 519)

[60] Li Y J. Study on mechanism of surface topograhpy effects on generation of cavitation erosion [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008
(李永健. 空蚀发生过程中表面形貌作用机理研究 [D]. 北京: 清华大学, 2008)

[61] Espitia L A, Toro A. Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components [J]. Tribol. Int., 2010, 43: 2037

[62] Mochizuki H, Yokota M, Hattori S. Effects of materials and solution temperatures on cavitation erosion of pure titanium and titanium alloy in seawater [J]. Wear, 2007, 262: 522

[63] Kwok C T, Man H C, Leung L K. Effect of temperature, pH and sulphide on the cavitation erosion behaviour of super duplex stainless steel [J]. Wear, 1997, 211: 84

[64] Liao T T. Research on the effect of temperature, cavitation and erosion [J]. China Rural Water Hydropower, 2011, (10): 133
(廖庭庭. 温度与空化空蚀的影响关系研究 [J]. 中国农村水利水电, 2011, (10): 133)

[65] Franc J P, Riondet M, Karimi A, et al. Material and velocity effects on cavitation erosion pitting [J]. Wear, 2012, 274/275: 248

[66] Yong X Y, Lin Y Z, Liu J J, et al. Erosion corrosion of duplex stainless steel in flowing neutral chloride containing sand [J]. Acta Metall. Sin., 2001, 37(7): 745
(雍兴跃, 林玉珍, 刘景军等. 双相钢在流动中性含砂氯化物中的磨损腐蚀 [J]. 金属学报, 2001, 37(7): 745)

[67] Wang Z Y, Long N D, Zhu J H. Review on materials resistant to cavitation erosion and its application [J]. Develop. Appl. Mater., 2001, 16(6): 34
(王再友, 龙霓东, 朱金华. 抗空蚀材料研究应用进展 [J]. 材料开发与应用, 2001, 16(6): 34)

[68] Liu W, Zheng Y G, Jing H M, et al. Cavitation erosion of 20SiMn in single liquid and liquid-solid two-phase medium [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2001, 21(5): 286
(柳伟, 郑玉贵, 敬和民等. 20SiMn在单相液流和液固双相流中的空蚀行为 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(5): 286)

[69] Krella A. Influence of cavitation intensity on X6CrNiTi18-10 stainless steel performance in the incubation period [J]. Wear, 2005, 258: 1723

